模拟增温对土壤电导率的影响①

姚世庭[1]， 芦光新[1]， 王军邦[2]， 黄彩霞[1]， 王志慧[1]， 赵丽蓉[1]
(1. 青海大学,青海 西宁 810016; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘 要: 为研究模拟增温对土壤电导率的影响,为气候变化背景下高寒草地土壤盐渍化趋势动态研究提供理论基础。本研究选择位于青藏高原腹地的三江源草地生态系统监测定位站开展试验,自 2015 年 9 月至 2017 年 9 月对 OTC 增温室内外 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土壤温度、含水量以及电导率进行同步测定并分析其变化特征。结果表明: ① OTC 的模拟增温效果明显,与未采用 OTC 的对照相比,0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土壤温度分别增加 2.41 ℃和 1.27 ℃;增温导致 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 的土壤含水量分别增加 27.65% 和 32.17%; 0 ~ 15 cm 土壤电导率,增温处理和对照的观测值分别为 45.67 $\mu S \cdot m^{-1}$ 和 45.75 $\mu S \cdot m^{-1}$,而 15 ~ 30 cm 土壤电导率增温比对照高 158.09%。② 相关性分析表明,在土壤冻结期,土壤温度对土壤电导率的贡献大于土壤湿度,与对照相比,模拟增温条件下土壤含水量与电导率的相关性增加;在土壤消融期,与对照相比,模拟增温条件下 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土层土壤温度与电导率的相关性增加,土壤含水量与电导率的相关性随土层深度而不同,0 ~ 15 cm 土层土壤含水量与电导率的相关性增加,15 ~ 30 cm 土层土壤含水量与电导率的相关性变化不大。土壤温度对土壤电导率的贡献率高于土壤含水量。

关键词: 模拟增温; 电导率; 土壤水分; 土壤温度; 三江源区

以气候变暖和大气 CO_2 浓度升高为主要特征的全球气候变化,不仅影响人类自身健康,同时也影响人类赖以生存的生态系统的稳定性,进而严重威胁着人类的生存和社会经济的可持续发展[1]。青藏高原是我国重要的生态屏障,也是黄河等江河的发源地[2]。它拥有着世界上海拔最高,面积最大,类型最为独特的高寒草甸生态系统,属于典型的生态脆弱区[3]。其生态系统一旦遭到破坏,恢复重建的难度非常大。据预测,21 世纪末全球地表温度将升高 1.5 ~2.0 ℃,而高纬度、高海拔地区温度升幅将更大[4]。研究发现,近 30 a 来,青藏高原年平均气温以每年 0.05 ℃的速率增加,年均降水量 10.2 $mm \cdot (10a)^{-1}$ 的速度波动上升[5],该地区不仅气温升高,其土壤温度也一直呈上升趋势,从而影响土壤含水量变化[6]。

鉴于青藏高原生态的重要性和脆弱性,研究其高寒生态系统成为开展全球气候变化响应的重要课题,由于青藏高原地区过度放牧和农业垦植等人类活动,大片草地开始出现退化,草原土壤理化性质发生变化[7]。模拟增温实验表明,通过增温改变土壤温度和土壤水分含量,将改变土壤微生物的群落结构、生物量及土壤酶活性[8],对植物、土壤以及微生物群落产生极大的影响[9-10]。但这种影响与土壤深度、增温期长度等因素紧密相关。基于开顶式气室(open top chamber, OTC)的研究表明,土壤表层(0 ~15 cm)增温效应明显高于深层(15 ~30 cm)土壤[11],导致土壤表层微生物数量显著增加[12]。植物物种丰富度随温度升高而降低,生物量增加,但二者的变化与增温时间长短具有显著相关性[13]。

土壤电导率(EC)在一定程度上可以指示土壤中 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 等主要盐基离子的含量变化,是表征土壤水溶性盐的一个重要指标,影响土壤有效性养分、微生物组成与土壤结构等肥力因素,可反映土壤盐渍化程度[14]。温度是影响土壤理化性质的重要因素,土壤介质一般随温度变化,对于土壤电导率尤为明显[15]。因此,通过 OTC 试验研究土壤电

① **收稿日期:** 2019 - 09 - 24; **修订日期:** 2019 - 11 - 14
基金项目: 高寒草地土壤微生物漆酶基因多样性及其对土壤有机质转化机理的研究(31860103);高寒草地耐低温产漆酶真菌对珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)多酚类化合物降解作用的研究(31460152);青藏高原耐低温纤维素分解真菌多样性的研究(41261064);青海省应用基础研究项目“放牧干扰对高寒草甸生态系统水源涵养功能发挥的影响及作用机制研究”(2016 - ZJ - 726)资助
作者简介: 姚世庭(1995 -),女,硕士研究生,主要研究方向为高寒草地微生物多样性及功能利用. E-mail:2317523428@ qq. com
通讯作者: 芦光新. E-mail:lugx74@ qq. com

导率对模拟增温的响应,可以为预测未来气候变暖对高寒草地土壤盐渍化影响提供科学依据。然而,有关模拟增温对青藏高原高寒草地土壤电导率影响的报道较少,可见研究土壤电导率对温度的响应规律是很有必要的。

本研究选择位于青藏高原腹地的玉树州称多县高寒草甸生态系统作为试验区,通过 OTC 模拟增温,同步测定表层和深层土壤电导率和土壤温湿度,分析高寒草甸不同土层对模拟增温的响应及其季节动态,探讨高寒草甸生态系统对全球气候变暖的响应模式,为探究全球气候变化背景下三江源区高寒草甸土壤盐渍化的可能变化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

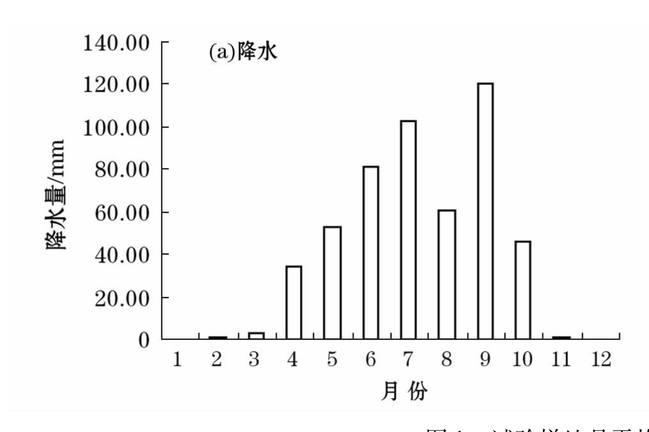
研究区位于青海省玉树州称多县珍秦镇的青海大学-清华大学三江源草地生态系统监测定位站,地理位置为 33°24′30″N, 97°18′00″E,海拔 4 270 m。气候类型属典型大陆性高原高寒气候,气候寒冷,四季不分明。2016 年降水 502.30 mm,主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 72.57%(图 1a);气温变化表现为单峰曲线(图 1b),8 月最高(11.2 ℃),1 月最低(-12.3 ℃);以气温 0 ℃为准,本研究将生长季分为消融期和冻结期。土壤类型为高山草甸土,植被类型为高寒草甸,建群种为莎草科高山嵩草(*Kobresia pygmaea*),伴生种有莎草科线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、薹草(*Carex* spp.),禾本科早熟禾(*Poa pratensis*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、异针茅(*Stipaaliena keng*)、洽草(*Koeleria cristata*)等;其他杂类草有黄花棘豆(*Oxytropis* spp.)、紫花棘豆(*Oxytropis subfalcata*)、钉柱萎陵菜(*Potentilla saundersiana*)、二裂萎陵菜(*Potentilla bifurca*)、唐松草(*Thalic-trum*)、兔耳草(*Lagotis ramalana*)、马先蒿(*Pediculairs* spp.)等。

1.2 模拟增温试验

模拟增温试验开始于 2013 年 7 月,采用开顶式气室(OTC)为增温方法,由增温气室 6 块梯形聚碳酸酯板拼接装成正六边形棱台体,梯形板下底边长为 91.4 cm,上底边长为 62.6 cm,斜边长为 62.6 cm,高为 61.0 cm,上底边与斜边的夹角为 103.3°,下底边与斜边的夹角为 76.7°,将下底边以宽度为 5.0 cm 的铝合金条固定,梯形板之间用螺丝固定。试验期内将增温气室底部的铝合金边扎入土中,保证增温室和地面的密闭性,同时也避免冬季大风吹移。样地所处地点地势平坦,植物群落组成相对均一;为保证试验样地不受干扰和破坏,用围栏封闭,禁止放牧活动。为达到良好的模拟增温效果,OTC 全年置于样地内,在进行观测时不将其移开,避免人为干扰对群落的影响。即为增温(T,temperature enhancement)处理和以未加 OTC 处理为对照(CK,control check),每个处理重复 3 次,随机排列,重复样地间距为 3 m。

1.3 样地环境数据采集及样地维护

采用土壤三参数自动测定系统,同步监测增温和对照样地 0~15 cm 和 15~30 cm 的土壤电导率及土壤温湿度,以 6 通道数据采集器 CR1000 记录数据,数据采样频率为 60 min。测定系统是 QT-1010 自动气象站,其中,土壤电导率、温度和水分传感器是 GS3(北京渠道科学器材有限公司);采用 HOBOU30小型自动气象站观测降水、气温和相对



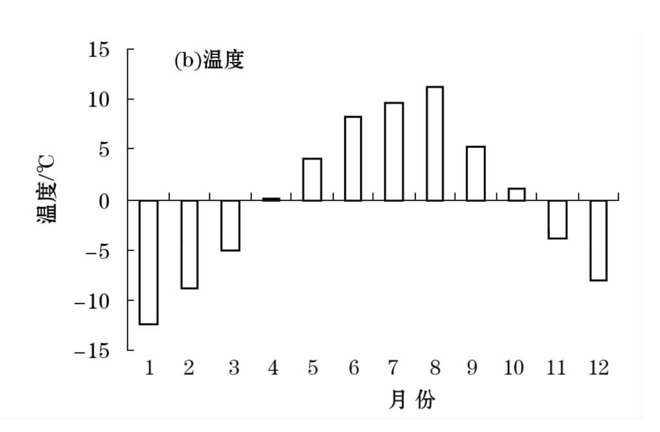


图 1 试验样地月平均温度和月降雨量变化

Fig. 1 Experimental monthly mean temperature and monthly rainfall

湿度。

1.4 数据分析

采用 DPS 15.10 版数据处理系统进行数据分析,数据分析包括异常值处理和数据统计分析,得到不同土层土壤水分、温度和电导率每日数据,进行因子分析和偏相关分析,分析土壤电导率与温度、含水量之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 OTC 的模拟增温效应

根据试验样地 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 深度土壤温度的每小时观测数据,模拟增温效果明显。季节变化特征表现见图 2,OTC 模拟增温室内、外不同深度(0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm)土壤温度的年内变化总体趋势一致。顶层土壤增温效应差异大于底层土壤,生长季差异较小,非生长季差异较大(图 3a 和图 3b)。OTC 模拟增温室内 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土层的土壤年平均温度均高于对照中相应土层的土壤年平均温度,土层 0 ~ 15 cm 的土壤年平均温度增加了 2.41 ℃,15 ~ 30 cm 土层的土壤年平均温度增加了 1.27 ℃(图 3c)。

OTC 模拟增温导致消融和冻结日期发生变化。简单地以是否大于 0 ℃为消融和冻结期判断,室外对照实验中顶层和底层土壤日平均温度大于 0 ℃的天数分别为 236 d 和 260 d,OTC 模拟增温试验中对应数据分别为 261 d 和 286 d。表明 OTC 模拟增温处理使土壤冻结期缩短。其中,顶层土壤开始消融日期提前了 23 d,开始冻结日期推迟了 2 d,导致整个消融期延长了 25 d;深层土壤开始消融日期提前了 16 d,开始冻结日期推迟了 10 d,导致整个消融期延长了 26 d(表 1)。

2.2 模拟增温对土壤水分的影响

土壤水分增加存在较大的季节变化特征,且表层和底层土壤间存在差异(图 4)。与对照相比,OTC 增温室内土壤 0 ~ 15 cm 土层水分变化复杂,1—5 月土壤含水量差异较大,5—10 月土壤含水量差异较小,11—12 月土壤含水量差异较大;而在底层土壤 15 ~ 30 cm 处,OTC 增温室内 1—12 月土壤含水量明显高于 OTC 增温室外的土壤含水量。生长季与非生长季差异较大(图 5a 和 5b)。模拟增温导致上下层土壤含水量均增加,其中 0 ~ 15 cm 土壤含水量增加 27.65% ,15 ~ 30 cm土壤含水量增加

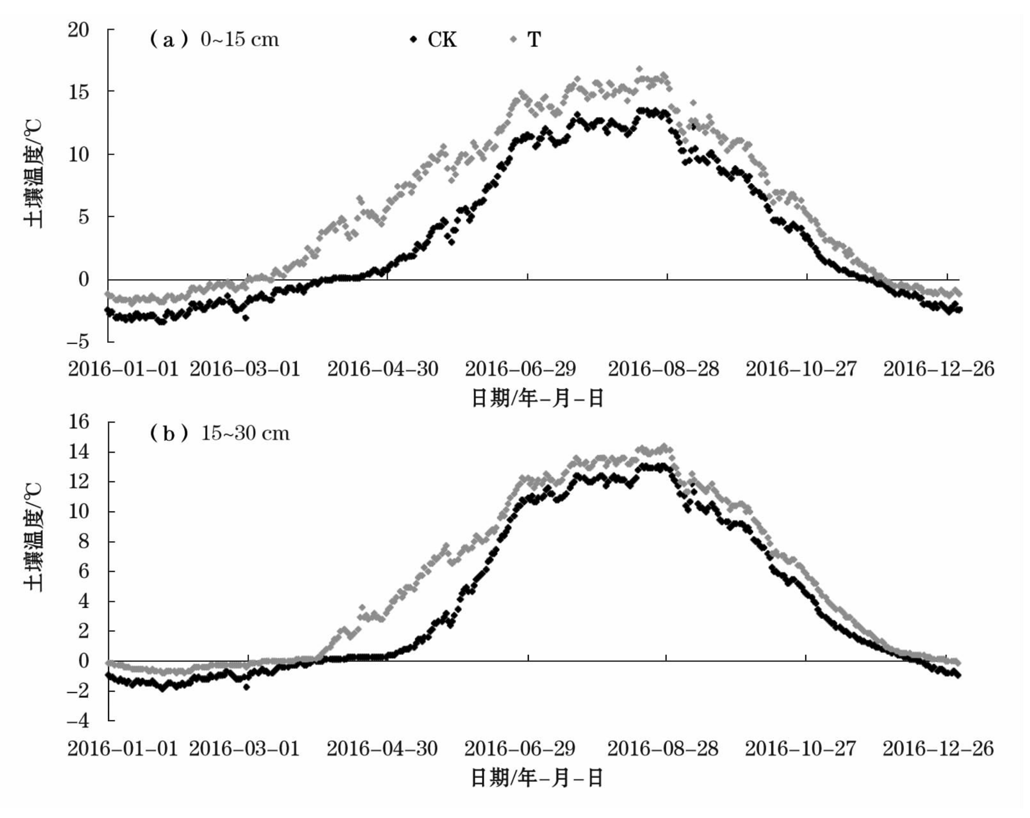


图 2 OTC 模拟增温室内(T)、外(CK)0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土壤温度季节动态

Fig. 2 Seasonal dynamics of 0 - 15 cm and 15 - 30 cm soil temperature in OTC simulated warming room (T) and outside (CK)

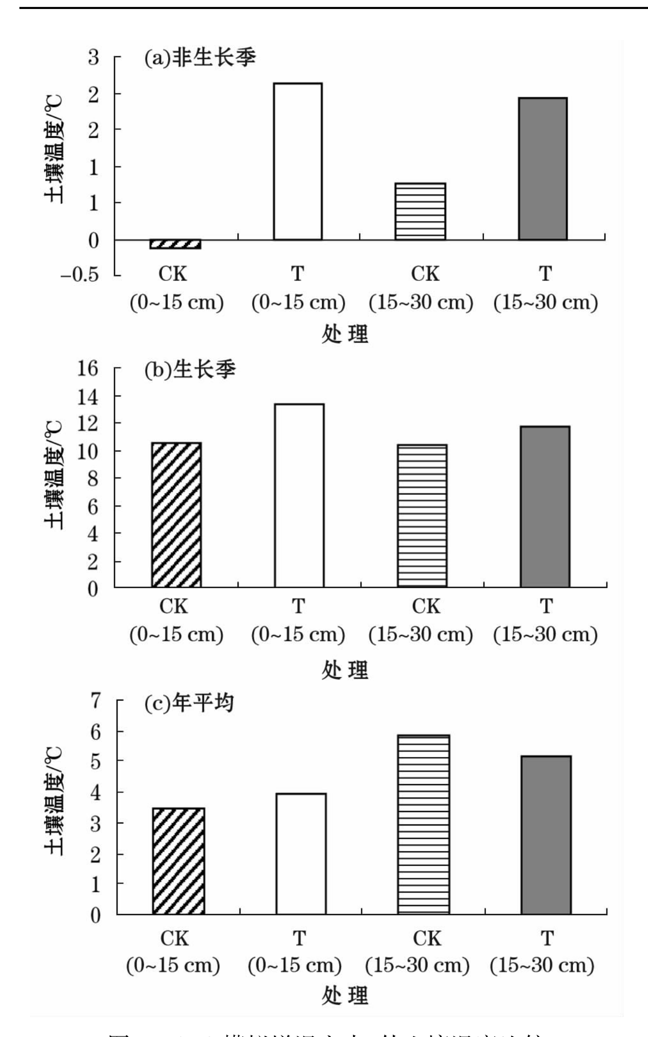


图 3 OTC 模拟增温室内、外土壤温度比较

Fig. 3 Comparison of soil temperature between indoor and outdoor in OTC simulated warming

表 1 不同土层冻结和消融时间

Tab. 1 Freezing and ablation time of different soil layers

处理	土层/cm	开始消融日期	开始冻结日期	消融期长度/d
对照	0 ~ 15	2016 - 04 - 04	2016 - 11 - 25	236
	15 ~ 30	2016 - 04 - 02	2016 - 12 - 17	260
增温	0 ~ 15	2016 - 03 - 12	2016 - 11 - 27	261
	15 ~ 30	2016 - 03 - 17	2016 - 12 - 27	286

32.17%(图 5c)。

2.3 模拟增温对土壤电导率的影响

土壤电导率 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土层间存在差异(图 6),与对照相比,1—4 月 OTC 增温室内 0 ~ 15 cm 土层土壤电导率高于 OTC 增温室外,5—10 月土壤电导率低于 OTC 增温室外,11—12 月,土壤电导率高于 OTC 增温室外;15 ~ 30 cm 土层 OTC 增温室内 1—12 月土壤电导率高于 OTC 增温室外,土壤电导率的变化趋势与土壤含水量基本一致。

模拟增温下,由图 7a 和 7b 可以看出,在非生长季,表层土壤增温处理下土壤电导率大于对照,在生长季,表层土壤增温处理下土壤电导率小于对照;15 ~ 30 cm 土层土壤电导率在生长季与非生长季变化趋势一致,皆为增温大于对照。由图 7c 可以看出,OTC 增温室内、外 0 ~ 15 cm 土层的电导率分别为 45.67 $\mu S \cdot m^{-1}$ 和 45.75 $\mu S \cdot m^{-1}$。OTC 增温室内 15 ~ 30 cm 土层的电导率比室外高 158.09%。说明模拟增温对15 ~ 30 cm土层土壤电导率的影响

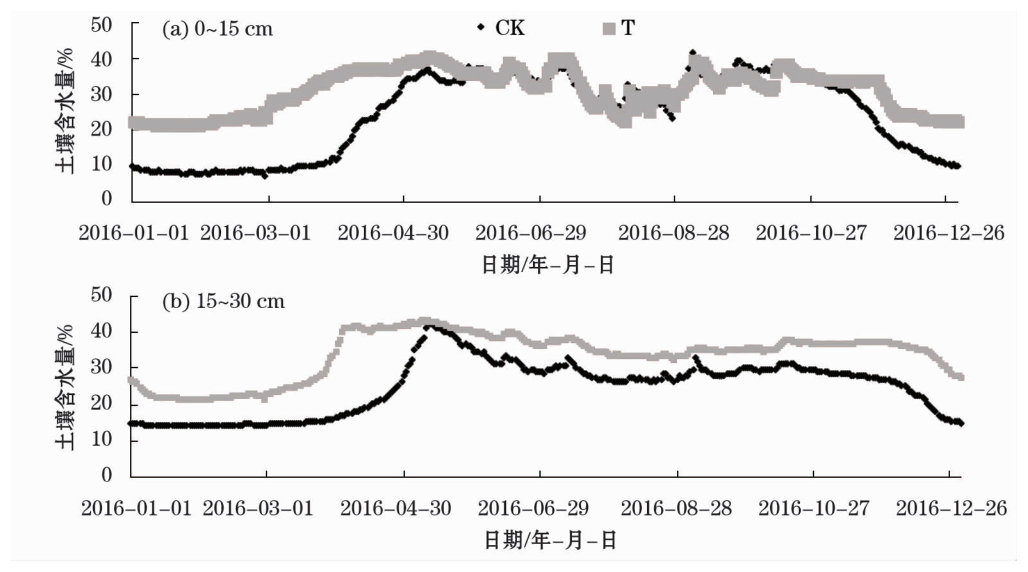


图 4 模拟增温(T)和对照(CK)试验中土壤 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 含水量变化动态

Fig. 4 Dynamic changes of soil water content of 0 - 15 cm and 15 - 30 cm in simulated temperature increase (T) and control (CK) experiments

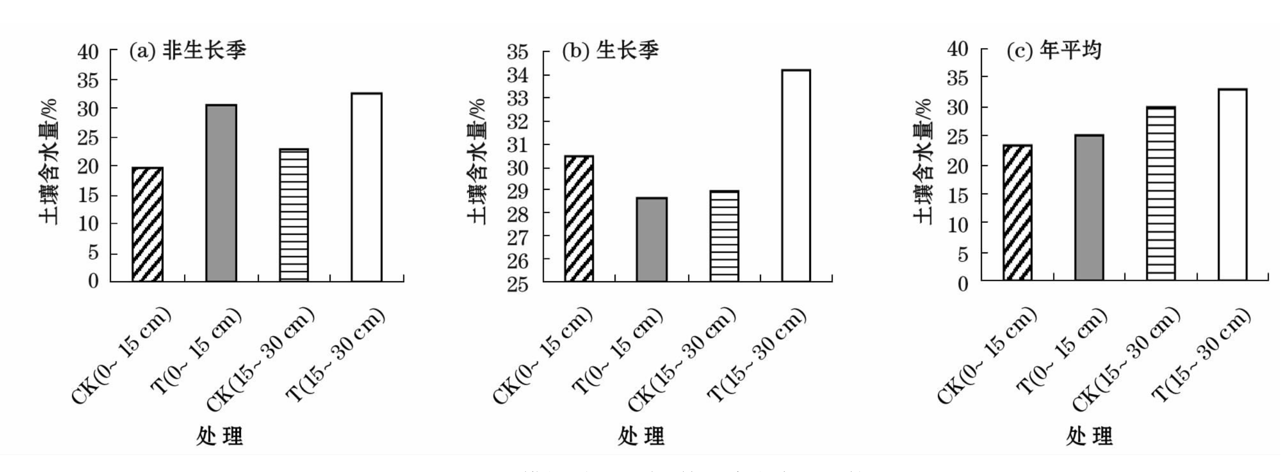


图 5　OTC 模拟增温室内、外土壤含水量比较

Fig. 5　Comparison of soil moisture content in indoor and outdoor of OTC simulated warming

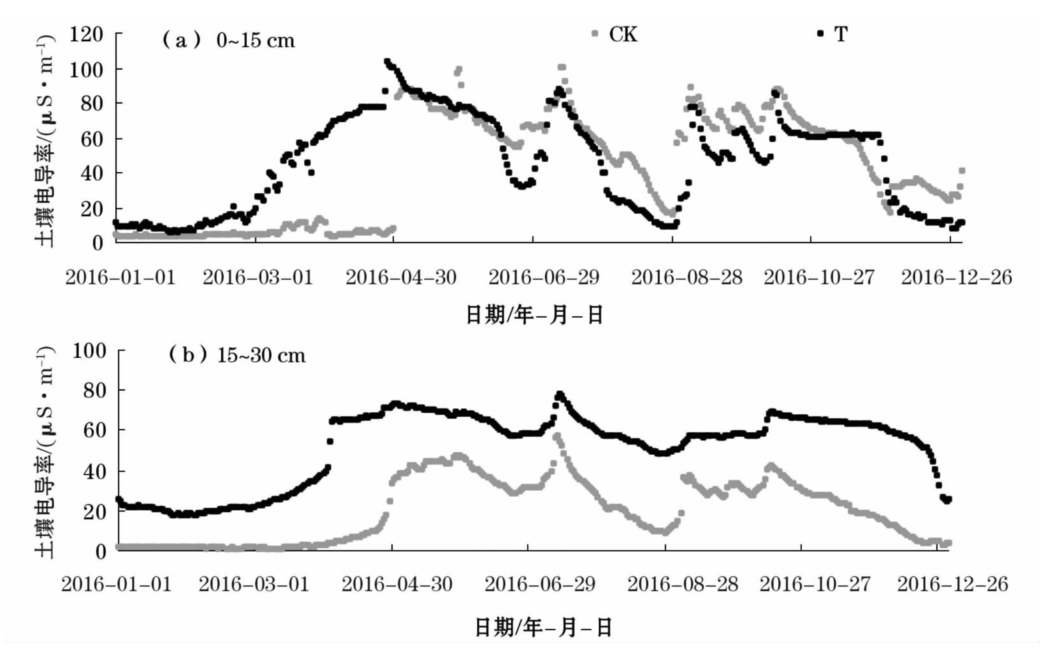


图 6　模拟增温(T)和对照(CK)试验中土壤 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 电导率变化动态

Fig. 6　The dynamic changes of soil electrical conductivity at 0 – 15 cm and 15 – 30 cm in simulated temperature increase(T) and control(CK) experiments

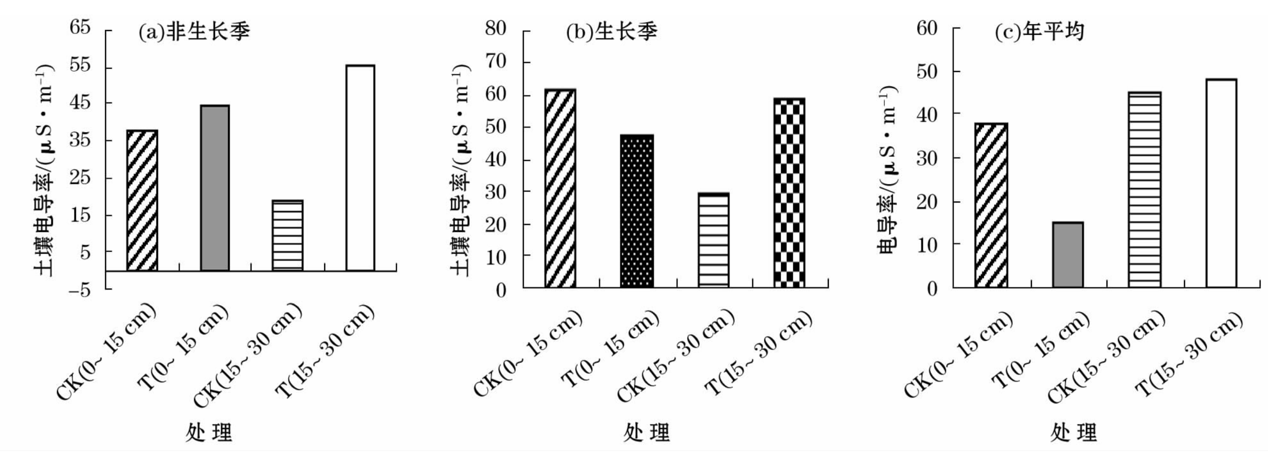


图 7　OTC 模拟增温室内、外土壤电导率比较

Fig. 7　Comparison of soil conductivity between indoor and outdoor in OTC simulated warming

程度大,但 0 ~ 15 cm 土层的土壤电导率几乎不受增温的影响。

2.4 冻结期土壤温度、含水量与电导率的相关性

土壤冻结期和消融期土壤电导率与土壤温度、土壤湿度的相关性分析表明(表 2),在模拟增温室外 0 ~ 15 cm 土层中,土壤温度与土壤电导率为正相关关系,偏相关系数(*r*)达到 0.511 0($P<0.01$);土壤湿度与土壤电导率为正相关关系,偏相关系数(*r*)达到 0.928 9($P<0.01$)。15 ~ 30 cm 土层中,土壤温度与土壤电导率为负相关关系,偏相关系数(*r*)达到 0.244 1($P<0.05$);土壤湿度与土壤电导率为正相关关系,偏相关系数(*r*)达到 0.686 5($P<0.01$)。

在模拟增温室内, 0 ~ 15 cm 土层中,土壤温度与土壤电导率为负相关关系,偏相关系数(*r*)达到 0.049 5($P<0.01$),土壤湿度与土壤电导率为正相关关系,偏相关系数(*r*)达到 0.942 4($P<0.01$)(相关系数临界值,$a=0.05$ 时, $r=0.190\ 9$, $a=0.01$ 时,$r=0.249\ 2$)。15 ~ 30 cm 土层,土壤温度与土壤电导率为正相关关系,偏相关系数(*r*)达到 0.555 9($P<0.01$);土壤湿度与土壤电导率为正相关关系,偏相关系数达到 $r=0.836\ 4$($P<0.01$)(相关系数临界值,$a=0.05$ 时,$r=0.218\ 5$, $a=0.01$ 时,$r=0.284\ 7$)。在土壤冻结期,与对照相比,模拟增温条件下土壤含水量与电导率的相关性增加。土壤温度对土壤电导率的贡献大于土壤湿度。

2.5 消融期土壤温度、含水量与电导率的相关性(偏)

在模拟增温室外,0 ~ 15 cm 土层,土壤温度与土壤电导率为负相关关系(表 3),相关系数(*r*)达到 0.435 1($P<0.01$);土壤湿度与土壤电导率为正相关关系,偏相关系数(*r*)达到 0.820 9($P<0.01$)(相关系数临界值,$a=0.05$ 时,$r=0.128\ 0$,$a=0.01$ 时,$r=0.167\ 7$)。15 ~ 30 cm 土层,土壤温度与土壤电导率为正相关关系,偏相关系数(*r*)达到 0.533 8($P<0.01$),土壤湿度与土壤电导率为正相关关系,相关系数(*r*)达到 0.916 2($P<0.01$)(相关系数临界值,$a=0.05$ 时, $r=0.121\ 9$,$a=0.01$ 时,$r=0.159\ 8$)。在模拟增温室外,0 ~ 15 cm 土层,土壤温度与土壤电导率为负相关关系,偏相关系数(*r*)达到 0.160 3($P<0.01$);土壤湿度与土壤电导率为正相关关系,偏相关系数(*r*)达到 0.685($P<0.01$)(相关系数临界值,$a=0.05$ 时,$r=0.121\ 7$,$a=0.01$ 时,$r=0.159\ 5$);15 ~ 30 cm 土层中,土壤温度与土壤电导率为正相关关系,相关系数(*r*)达到 0.628 2($P<0.01$),土壤湿度与土壤电导率为正相关关系,相关系数(*r*)达到 0.914 6($P<0.01$)(相关系数临界值,$a=0.05$ 时, $r=0.116\ 2$,$a=0.01$ 时,$r=0.152\ 4$)。在土壤消融期,与对照相比,模拟增温条件下 0 ~ 15 cm 和 15 ~ 30 cm 土层土壤温度与电导率的相关性增加,土壤含水量与电导率的相关性随土层深度而不同,0 ~ 15 cm 土层土壤含水量与电导率的相关性增加,15 ~ 30 cm 土层土壤含水量与电导率的相关性变化不大。土壤温度对土壤电导率的贡献率高于土壤含水量。和冻结期相比,土壤温度对土壤电导率的贡献率减少,而土壤湿度对土壤电导率的贡献率增加。

表 2 冻结期土壤温度、含水量与电导率的相关性(偏)

Tab. 2 Correlation between soil temperature, water content and conductivity during freezing period (bias)

处理	土层/cm	电导率		
		指标	相关系数(*r*)	贡献率/%
对照	0 ~ 15	土壤温度	0.511 0**	88.36
		土壤湿度	0.928 9**	10.64
	15 ~ 30	土壤温度	0.244 1*	79.98
		土壤湿度	0.686 5**	16.00
增温	0 ~ 15	土壤温度	-0.049 5**	92.16
		土壤湿度	0.942 4**	7.26
	15 ~ 30	土壤温度	0.555 9**	93.45
		土壤湿度	0.836 4**	5.35

注:* 表示 0.05 显著水平, * * 表示 0.01 显著水平。下同。

表 3 消融期土壤温度、含水量与电导率的相关性(偏)

Tab. 3 Correlation between soil temperature, water content and conductivity during ablation period (bias)

处理	土层/cm	电导率		
		指标	相关系数(*r*)	贡献率/%
对照	0 ~ 15	土壤温度	-0.435 1**	66.28
		土壤湿度	0.820 9**	28.53
	15 ~ 30	土壤温度	0.533 8**	62.85
		土壤湿度	0.916 2**	34.50
增温	0 ~ 15	土壤温度	-0.160 3**	76.79
		土壤湿度	0.968 5**	22.39
	15 ~ 30	土壤温度	0.628 2**	62.82
		土壤湿度	0.914 6**	34.64

3 讨论与结论

3.1 OTC 模拟增温的环境效应

通过本研究对比模拟增温和对照试验发现,模

拟增温影响土壤温度的同时，也对土壤湿度和土壤电导率产生影响，可能产生复杂的物理和化学连锁反应，进而影响微生物系统甚至整个生态系统的生物学过程。目前，对 OTC 试验的模拟增温效应已经有大量的研究，并且也发现增温使土壤相对含水量增加[16-17]。土层 0～15 cm 的土壤年平均温度增加了 2.41 ℃，15～30 cm 土层的土壤年平均温度增加了 1.27 ℃，说明模拟增温对 0～15 cm 土壤温度的影响比 15～30 cm 更大。OTC 模拟增温处理使土壤冻结期缩短。其中，0～15 cm 土层土壤开始消融日期提前了 23 d，开始冻结日期推迟了 2 d，导致整个消融期延长了 25 d。15～30 cm 土层土壤的开始消融日期提前了 16 d，开始冻结日期推迟了 10 d，导致整个消融期延长了 26 d。这也恰好说明了土壤水分的变化情况，模拟增温导致上下层土壤含水量均增加，其中 0～15 cm 土壤含水量增加 27.65%，15～30 cm 土壤含水量增加 32.17%。含水量增加的原因是因为增温棚内温度较棚外高，棚内固态水转化为液态水，进而观测到土壤含水量增加。而在消融期，增温加速了表层土壤水分的蒸发，从而使土壤含水量下降。

3.2 土壤电导率的变化

由于土壤的电导率和水溶性盐存在明显的相关关系，目前国内主要以测定土壤电导率来反映土壤水溶性盐的含量[18]。本次试验结果表明，增温后不同土层土壤电导率变化明显。从整体上可以看出，15～30 cm 处增温比对照的电导率高，这可能是因为增温处理后土壤的温度上升，导致土壤水温升高，水的黏度降低，离子的迁移速度加快，最后使土壤电导率升高。而在 0～15 cm 处生长季的土壤电导率比对照低，可能是因为此时正好为植物生长季，土壤中的盐溶液被植物生长所吸收利用[19]，导致土壤电导率降低[20]。查阅资料发现，对于青藏高原的草地土壤盐分临界指标很少，尤其在高寒草甸上仍为一个空白，今后应加强对青藏高原高寒草地土壤盐分障碍指标的研究。西北地区的草原草地退化愈加严重，成因离不开土壤质量下降[21-22]，而土壤盐渍化的问题不容小觑。土壤盐渍化会造成作物产量下降，对土壤理化性质、微生物群落和生态环境造成不良影响[23-24]，不利于自然生态系统的可持续发展，而对于青藏高原以畜牧业为主的地区来说，草地土壤质量与生态环境和农业可持续发展更是息息相关，因此，加强耕地土壤质量保护，防治土壤退化带来的农业生产和生态环境的不利影响，是当前青藏高原发展绿色农业生产面临的主要问题。

参考文献(References)：

[1] 王力. 青藏高原东北部农作物与牧草物候特征及其对气候变化的响应[D]. 兰州：兰州大学，2018. [Wang Li. Characteristics of Crops and Pasture Phenology in the Northeastern Tibetan Plateau and Their Responses to Climate Change[D]. Lanzhou：Lanzhou University，2018.]

[2] 李军乔. 三江源地区生态环境重建对策研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2002. [Li Junqiao. Research on Ecological Environment Reconstruction in Sanjiangyuan Area[D]. Yangling：Northwest A & F University，2002.]

[3] 牟雪洁，赵昕奕，饶胜，等. 青藏高原生态屏障区近 10 年生态系统结构变化研究[J]. 北京大学学报，2016，52(2)：279－286. [Mou Xuejie，Zhao Xinyi，Rao Sheng，et al. changes in ecosystem structure and other research nearly 10 years of ecological barrier area of the Tibetan Plateau[J]. Peking University，2016，52(2)：279－286.]

[4] 马丽，徐满厚，翟大彤，等. 高寒草甸植被－土壤系统对气候变暖响应的研究[J]. 生态学杂志，2017，36(6)：1708－1717. [Ma Li，Xu Manhou，Zhai Datong，et al. Study on the response of alpine meadow vegetation-soil system to climate warming[J]. Journal of Ecology，2017，36(6)：1708－1717.]

[5] 杨元合. 全球变化背景下的高寒生态过程[J]. 植物生态学报，2018，42(1)：1－5. [Yang Yuanhe. Alpine ecological processes under the background of global change[J]. Chinese Journal of Plant Ecology，2018，42(1)：1－5.]

[6] 李艳萍，史利江，徐满厚，等. 短期增温下青藏高原多年冻土区植物生长季土壤水分的动态变化[J]. 干旱区研究，2019，36(3)：537－545. [Li Yanping，Shi Lijiang，Xu Manhou，et al. Dynamic changes of soil moisture in the perennial permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau under short-term warming[J]. Arid Zone Research，2019，36(3)：537－545.]

[7] 斯贵才，袁艳丽，王建，等. 围封对当雄县高寒草原土壤微生物和酶活性的影响[J]. 草业科学，2015，32(1)：1－10. [Si Guicai，Yuan Yanli，Wang Jian，et al. Effects of enclosure on soil microbes and enzyme activities in alpine grassland of Dangxiong County[J]. Pratacultural Science，2015，32(1)：1－10.]

[8] 温小成，芦光新. 模拟增温和氮素添加对高寒草地植物群落的影响[J]. 草业与畜牧，2015(2)：38－43. [Wen Xiaocheng，Lu Guangxin. Effects of simulated warming and nitrogen addition on plant communities in alpine grassland[J]. Planting and Animal Husbandry，2015(2)：38－43.]

[9] Arft A M，Walker M D，Gurevitch J，et al. Responses of tundraplants to experimental warming：Meta-analysis of the international tun-

dra experiment[J]. Ecological Monographs,1999,69(4):491 - 511.

[10] 朴世龙,方精云. 1982—1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化田[J]. 自然资源学报,2002,17(3):373 -380. [Piao Shilong,Fang Jingyun. Net primary productivity and its temporal and dpatial variation fields over the Tibetan Plateau from 1982 to 1999[J]. Journal of Natural Resources,2002,17(3):373 -380.]

[11] 权欣,芦光新,李希来,等. 三江源区高寒草甸 OTCs 模拟增温效应的研究[J]. 草业与畜牧,2016(1):19 - 24. [Quan Xin, Lu Guangxin, Li Xilai, et al. the other research OTCs simulated global warming effects of alpine meadow Three Rivers area[J] Grassland and Animal Husbandry,2016(1):19 -24.]

[12] 李欣,李峰科,芦光新,等. 模拟增温对高寒草甸土壤三大类微生物数量的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志,2017,47(2):6 -11. [Li Xin,Li Fengke,Lu Guangxin,et al. Effects of simulated warming on the number of microbial populations in alpine meadow soils[J]. Journal of Qinghai Animal Husbandry and Veterinary Medicine,2017,47(2):6 -11.]

[13] 徐满厚,薛娴. 气候变暖对陆地植被 - 土壤生态系统的影响研究[J]. 生命科学,2012,24(5):492 - 500. [Xu Manhou. Xue Xian. Study on the impact of climate warming on terrestrial vegetation-soil ecosystem[J]. Life Sciences,2012,24(5):492 -500.]

[14] 刘广明,杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. 土壤通报,2001,32(增刊):85 -87. [Liu Guangming, Yang Jinsong. Experimental Study on the relationship between soil salinity and soil conductivity and water content[J]. Chinese Journal of Soil Science,2001,32(Suppl.):85 -87.]

[15] 刘磊. 土壤电阻率估算及影响因素研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2011. [Liu Lei. Estimation of Soil Resistivity and Its Influencing Factors[D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology,2011.]

[16] 傅伯杰,田汉勤,陶福禄,等. 全球变化对生态系统服务的影响[J]. 中国基础科学,2017,19(6):14 -18. [Fu Bojie,Tian Hanqin,Tao Fulu,et al. The impact of global change on ecosystem services[J]. Basic Science of China,2017,19(6):14 -18.]

[17] 沈瑞昌,徐明,方长明,等. 全球变暖背景下土壤微生物呼吸的热适应性:证据 DUNA 机理和争议[J]. 生态学报,2018,38(1):11 -19. [Shen Ruichang,Xu Ming,Fang Changming,et al. Thermal adaptability of soil microbial respiration under global warming:Evidence mechanism and controversy[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(1):11 -19.]

[18] 赵振亮,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等. 新疆典型绿洲土壤电导率和 pH 值的光谱响应特征[J]. 中国沙漠,2013,33(5):1413 -1419. [Zhao Zhenliang,Tashpolat Tiyip,Ding Jianli,et al. Spectral response characteristics of soil conductivity and pH in typical oasis in Xinjiang[J]. Journal of Desert Research,2013,33(5):1413 -1419.]

[19] 王蓓,孙庚,罗鹏,等. 模拟升温和放牧对高寒草甸土壤微生物群落的影响[J]. 应用与环境生物学报,2011,17(2):151 - 157. [Wang Bei,Sun Geng,Luo Peng,et al. Effects of simulated warming and grazing on soil microbial communities in alpine meadows[J]. Journal of Applied and Environmental Biology,2011,17(2):151 -157.]

[20] 姜凌,李佩成,胡安众,等. 干旱区绿洲土壤盐渍化分析评价[J]. 干旱区地理,2009,32(2):234 - 239. [Jiang Ling,Li Peicheng,Hu Anzhong,et al. Analysis and evaluation of soil salt destruction in oasis in arid areas[J]. Arid Land Geography,2009,32(2):234 -239.]

[21] 买买提·阿扎提,艾力克木·卡德尔,吐尔逊·哈斯木. 土壤盐渍化及其治理措施研究综述[J]. 环境科学与管理,2008(5):29 -33. [Mamat Gazat,Alkam Kadir,Tursun Kasim. Review of soil salinization and its control measures[J]. Environmental Science and Management,2008(5):29 - 33.]

[22] 鲁春霞,于云江,关有志. 甘肃省土壤盐渍化及其对生态环境的损害评估[J]. 自然灾害学报,2001,10(1):99 -102. [Lu Chunxia,Yu Yunjiang,Guan Youzhi. Evaluation of soil salinization and its damage to ecological environment in Gansu Province[J]. Journal of Natural Disasters,2001,10(1):99 -102.]

[23] 曹建荣,徐兴永,于洪军,等. 黄河三角洲土壤盐渍化原因分析与生态风险评价[J]. 海洋科学进展,2014,32(4):508 -516. [Cao Jianrong,Xu Xingyong,Yu Hongjun,et al. Cause analysis and ecological risk assessment of soil salinization in the Yellow River Delta[J]. Progress of Marine Science,2014,32(4):508 - 516.]

[24] Ghassemi F,Jakeman A J,Nix H A. Salinisation of land and water resources:Human causes extent management and case studies[J]. Canberra,1995,40(2):145 -147.

Effect of simulated warming on soil conductivity

YAO Shi-ting[1], LU Guang-xin[1], WANG Jun-bang[2], HUANG Cai-xia[1],
WANG Zhi-hui[1], ZHAO Li-rong[1]
(1. *Qinghai University*, *Xining* 810016, *Qinghai*, *China*;
2. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101, *China*)

Abstract: In order to study the effect of simulated warming on soil conductivity, we developed a theoretical basis for the dynamic study of soil salinization trends in alpine grassland affected by climate change. We used the Sanjiangyuan grassland ecosystem monitoring and locating station located in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau as a focus for our analyses. From September 2015 to September 2017, OTC warming for small indoor and outdoor 0 – 15 cm and 15 – 30 cm soil temperatures, water content, and conductivity were measured simultaneously and analyzed for changes. The results showed obvious simulated temperature increases of OTC. Compared with the control without OTC, soil temperature at 0 – 15 cm and 15 – 30 cm increased by 2.41 ℃ and 1.27 ℃, respectively. These temperature increases resulted in 0 – 15 cm and 15 – 30 cm soil water contents increasing by 27.65% and 32.17% respectively. For soil conductivity at 0 – 15 cm and 15 – 30 cm, the observed values of temperature increase treatment and control were 45.67 $\mu S \cdot m^{-1}$ and 45.75 $\mu S \cdot m^{-1}$, respectively. The increase in conductivity was 158.09% higher than the control. Correlation analysis showed that soil temperature contributed more to soil conductivity than soil moisture during soil freezing periods. Compared with the control experiment, soil water content and conductivity under simulated warming conditions showed rate increases. During the soil ablation period, a correlation between soil temperature and conductivity for the 0 – 15 cm and 15 – 30 cm soil layers increased under simulated warming, and the correlative relationship between soil water content and conductivity increased. The nature of the soil varies with depth. The correlation between soil water content and conductivity increases in the 0 – 15 cm soil layer, and the correlation between soil water content and conductivity in 15 – 30 cm soil layer is not significant. The contribution of soil temperature to soil conductivity is higher than the contribution of soil water content.

Key words: simulated warming; conductivity; soil water; soil temperature; Sanjiangyuan region